

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی - درمانی قزوین
دانشکده بهداشت

عنوان

کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط های آبی

استاد راهنما

دکتر حمزه علی جمالی

استاد مشاور

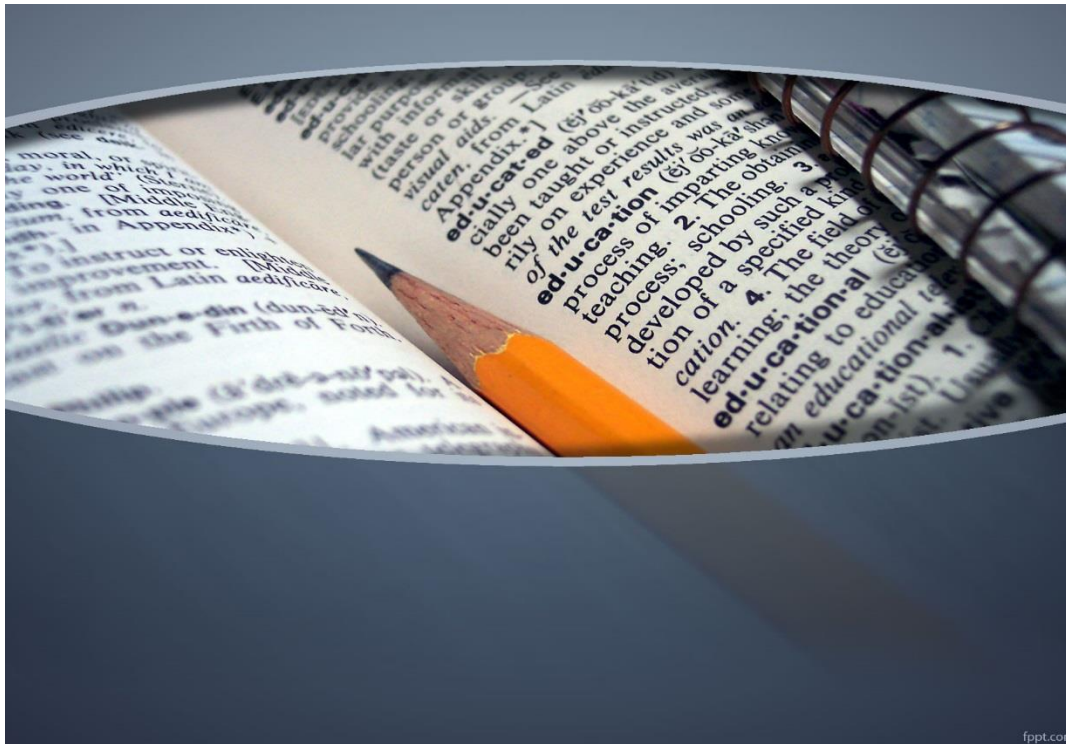
دکتر رضا قنبری

دانشجو

مرضیه تیموری

تیرماه ۹۶

مقدمه و بیان مسئله



مقدمه و بیان مسئله

فلزات سنگین گروهی از ترکیبات معدنی هستند که عملکردشان در بدن انسان ناشناخته است و برای انسان و محیط زیست زیان آور می باشند. حضور این فلزات در فاضلاب های صنایع، به عنوان یکی از آلاینده های مهم زیست محیطی مطرح است.

با افزایش فعالیت های صنعتی و توسعه تکنولوژی، رهاسازی فلزات سنگین در محیط زیست افزایش یافته است. بنابراین فلزات سنگین به عنوان تهدید جدی برای محیط و سلامت انسان مطرح هستند.

فلزات سنگین از بین نمی روند و کاهش نمی یابند، علاوه بر این، تجزیه این فلزات در شرایط طبیعی به آهستگی صورت می گیرد.

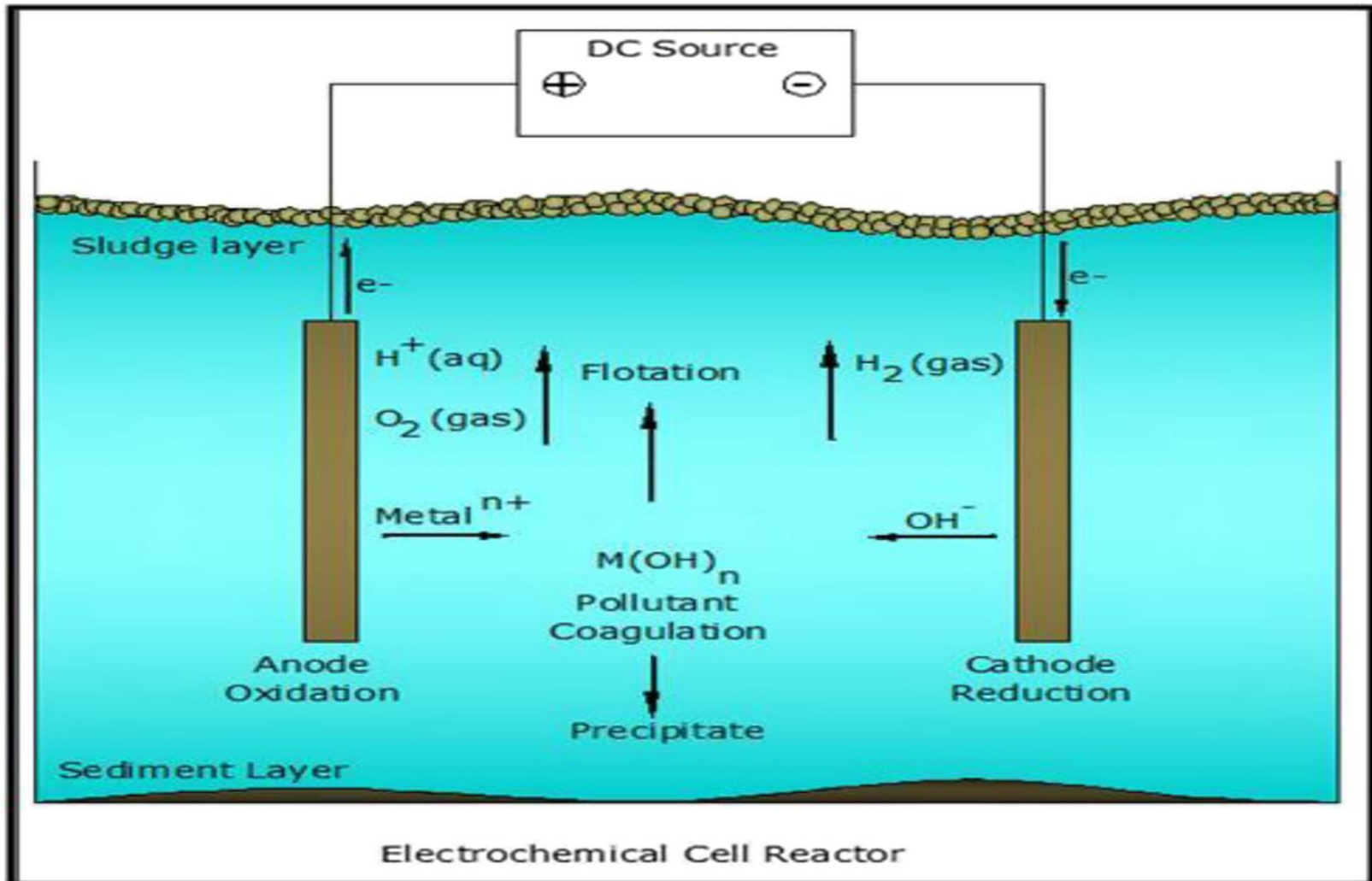
مقدمه و بیان مسئله

یون‌های فلزات سنگین آلاینده‌های غیر قابل تجزیه زیستی هستند. آن‌ها دارای بقای طولانی مدت در اکوسیستم‌های طبیعی هستند و قابلیت تجمع پذیری در زنجیره غذایی و بافت‌های زنده را دارند. مواجهه طولانی مدت با غلظت‌های بالای فلزات سنگین می‌تواند منجر به انواع اختلالات و بیماری‌ها گردد.

مقدمه و بیان مسئله

منابع	معایب	روشهای حذف فلزات سنگین
39. Harif, T. Khai, M. Adin, A. (2012).	نیاز به مواد شیمیایی زیاد و در نتیجه لجن تولیدی زیاد - هزینه های بالا	انعقاد شیمیایی
46. Gola D, Chauhan N, Malik A, Ziauddin A.Sh. (2016).	این روش برای محلول‌هایی مناسب است که تنها حاوی یک یا دو فلز سنگین هستند. کارایی این روش زمانی که برای حذف چندین فلز سنگین به کار گرفته می‌شود کاهش می‌یابد.	روش زیستی
53. Lopez, M.I. Colomer, N. Ruisánchez, I. Callao, M.P. (2014).	استفاده از جاذب‌ها به میل ترکیبی آن‌ها، تنوع و هزینه - اثر بخشی بستگی دارد. هنوز مشکلاتی در ارتباط با استفاده از جاذب‌ها وجود دارد که کاربرد آن را برای استفاده در نمونه‌های واقعی محدود می‌کند	روش جذب
57. Bouamra, F. Drouiche, N. Ahmed, D.S. Lounici, H. (2012). 65. Chou, W.L. Wang, C.T. Huang, K.Y. Liu, T.C. (2011). 66. Fajardo, A.S. Martins, R.C. Quinta-Ferreira, R.M. (2014). 68. Sadeddin, K. Naser, A. Firas, A. (2011).	مزایا فرآیند ساده ای است. نیاز به هیچ منعقد کننده ای ندارد. برای انواع فاضلاب های حاوی ترکیبات آلی یا معدنی قابل استفاده است. زمان بهره برداری از این روش کوتاه است.	روش انعقاد الکتریکی

شکل ۱ - واکنش های انجام شده در فرآیند انعقاد الکتریکی



تعیین کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط‌های آبی

- ۱- تعیین اثر pH در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در محیط‌های آبی
- ۲- تعیین اثر غلظت اولیه سرب، کادمیوم و کبالت در حذف آن‌ها با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در محیط‌های آبی
- ۳- تعیین اثر دانسیته جریان الکتریکی در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در محیط‌های آبی
- ۴- تعیین اثر زمان واکنش در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در محیط‌های آبی
- ۵- تعیین اثر فاصله بین الکترودها در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی در محیط‌های آبی

- ۱- آیا PH تأثیری در میزان حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط‌های آبی توسط فرآیند انعقاد الکتریکی دارد؟
- ۲- آیا تغییرات غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت تأثیری در راندمان حذف آن‌ها از محیط‌های آبی توسط فرآیند انعقاد الکتریکی دارد؟
- ۳- آیا دانسیته جریان الکتریکی تأثیری در میزان حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط‌های آبی توسط فرآیند انعقاد الکتریکی دارد؟
- ۴- آیا زمان واکنش تأثیری در میزان حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط‌های آبی توسط فرآیند انعقاد الکتریکی دارد؟
- ۵- آیا فاصله بین الکترودهای درون راکتور تأثیری در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت از محیط‌های آبی توسط فرآیند انعقاد الکتریکی دارد؟

مواد و روش کار



مرحله اول

انجام تعدادی آزمایش برای هر متغیر جهت به دست آوردن محدوده هر یک از متغیرها

مقایسه نتایج با نتیجه مطالعات دیگر محققین

مرحله دوم

تعیین سطوح کد بندی شده و واقعی متغیرها

طراحی آزمایشات

انجام آزمایشات

مرحله سوم

انجام آنالیزهای آماری

برازش و انتخاب مدل

بهینه سازی

راستی آزمایی نتایج

مراحل انجام کار در آزمایشگاه

مرحله اول

آماده سازی محلول ذخیره
1000 mg/l از هریک از
فلزات سرب، کادمیوم و کبالت

برداشت و رقیق سازی محلول
ذخیره و آماده سازی غلظت های
مورد نظر از هریک از فلزات برای
انجام آزمایشات

اضافه کردن ۲ لیتر از محلول
آماده سازی شده به راکتور

مرحله دوم

اتصال الکترودها به یک منبع تغذیه
جریان مستقیم

اضافه کردن ۲ mg نمک کلرید
سدیم برای افزایش رسانایی
الکتریکی فاضلاب

شروع فرآیند انعقاد الکتریکی و برداشت
نمونه با استفاده از پیپت ۵ میلی لیتری
حبابدار در فواصل زمانی تعیین شده در
طراحی آزمایشات

مرحله سوم

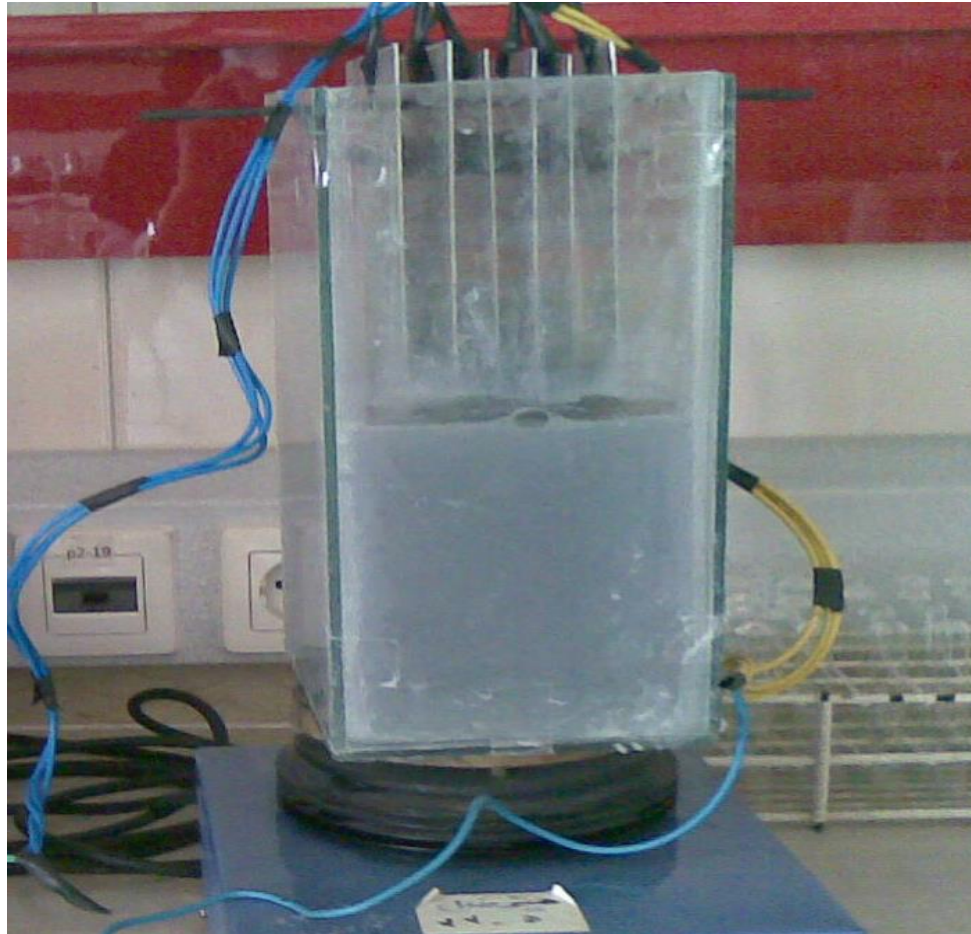
صاف سازی نمونه ها با استفاده از
دستگاه سانتریفیوژ

قرائت نمونه ها با استفاده از دستگاه
اسپکتروفتومتری جذب اتمی

محاسبه راندمان حذف فلزات سرب،
کادمیوم و کبالت با استفاده از رابطه:

$$\frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

شکل ۲- راکتور انعقاد الکتریکی در حال انجام کار



طراحی تحقیق



در این مطالعه اثرات پنج متغیر مستقل شامل pH، غلظت اولیه هر یک از فلزات سرب، کادمیوم و کبالت، زمان واکنش، دانسیته جریان و فاصله بین الکترودها روی راندمان حذف این فلزات مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با انجام آزمایش های مقدماتی در دامنه وسیعی از هر یک از متغیرهای مستقل، ناحیه مناسبی از هر متغیر به دست آمد. سپس با به کارگیری طرح مرکب مرکزی که یکی از زیر مجموعه های روش سطح پاسخ است، طراحی تحقیق توسط نرم افزار Design Expert 7.0 انجام شد. روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی ترکیبی از فنون ریاضی و آماری هستند که برای طراحی آزمایش های تجربی، بررسی اثرات اصلی و متقابل متغیرهای مستقل بر فرآیند، ارائه مدل پیش بینی و بهینه سازی فرآیندها به کار می روند.

جدول ۱ - متغیرهای مستقل مورد مطالعه برای حذف فلزات سرب، کادمیوم و کبالت و سطوح آنها

کد سطوح					علامت اختصاری	واحد	متغیرهای مستقل
-2.38	-1	0	+1	+2.38			
2.24	5	7	9	11.76	A	-	pH
15.5	50	75	100	134.5	B	mg/l	غلظت اولیه سرب و کادمیوم
2.43	30	50	70	97.5	B	mg/l	غلظت اولیه کبالت
9.32	30	45	60	80.7	C	min	زمان واکنش
1.31	2	2.5	3	3.69	D	mA/cm ²	دانسیته جریان
0.2	0.6	0.9	1.2	1.6	E	cm	فاصله بین الکترودها

جدول ۲ - طراحی آزمایش‌ها با استفاده از طرح مرکب مرکزی برای پنج متغیر مستقل مورد مطالعه در حذف سرب و کادمیوم و نتایج آن

شماره آزمایش	pH	غلظت اولیه فلز (mg/l)	زمان واکنش (min)	دانسیته جریان (mA/cm ²)	فاصله (cm)	راندمان حذف سرب و کادمیوم (%)			
						واقعی		پیش بینی شده	
						Pb	Cd	Pb	Cd
۱	۵	۵۰	۳۰	۲	۰/۶	۲۲	۲۰	۲۰/۵	۲۱/۱۸
۲	۹	۵۰	۳۰	۲	۰/۶	۳۵	۳۵	۳۶/۰۴	۳۷/۲۵
۳	۵	۱۰۰	۳۰	۲	۰/۶	۳۶	۳۶	۳۴/۹۳	۳۵/۷
۴	۹	۱۰۰	۳۰	۲	۰/۶	۲۵	۲۵	۲۰/۸	۲۰/۷۷
۵	۵	۵۰	۶۰	۲	۰/۶	۲۰	۲۰	۲۳/۷	۲۲/۰۳
۶	۹	۵۰	۶۰	۲	۰/۶	۶۵	۶۵	۶۰/۳۲	۵۹/۱
۷	۵	۱۰۰	۶۰	۲	۰/۶	۴۰	۴۰	۳۷/۴۶	۳۶/۵۵
۸	۹	۱۰۰	۶۰	۲	۰/۶	۳۵	۳۵	۴۳/۹۴	۴۲/۶۲
۹	۵	۵۰	۳۰	۳	۰/۶	۳۸	۳۸	۳۶/۴۳	۳۶/۸۴
۱۰	۹	۵۰	۳۰	۳	۰/۶	۵۲	۵۲	۵۰/۱۶	۵۲/۹۱
۱۱	۵	۱۰۰	۳۰	۳	۰/۶	۵۵	۵۵	۵۷/۸	۵۷/۱۱
۱۲	۹	۱۰۰	۳۰	۳	۰/۶	۳۸	۳۹	۴۱/۵۴	۴۲/۱۸
۱۳	۵	۵۰	۶۰	۳	۰/۶	۵۰	۵۰	۵۱/۳۲	۴۹/۴۴
۱۴	۹	۵۰	۶۰	۳	۰/۶	۸۵	۸۵	۸۵/۸۱	۵۱/۸۶
۱۵	۵	۱۰۰	۶۰	۳	۰/۶	۷۰	۷۰	۷۱/۷	۶۹/۷۱
۱۶	۹	۱۰۰	۶۰	۳	۰/۶	۸۳	۸۳	۷۶/۰۷	۷۵/۷۸
۱۷	۵	۵۰	۳۰	۲	۱/۲	۳۸	۳۸	۴۶/۰۳	۴۵/۴۹
۱۸	۹	۵۰	۳۰	۲	۱/۲	۷۵	۷۵	۶۹/۱۵	۶۹/۰۵
۱۹	۵	۱۰۰	۳۰	۲	۱/۲	۴۴	۴۴	۴۴/۲۹	۴۲/۲۶
۲۰	۹	۱۰۰	۳۰	۲	۱/۲	۳۸	۳۸	۳۷/۲۸	۳۴/۸۲
۲۱	۵	۵۰	۶۰	۲	۱/۲	۵۱	۵۱	۴۵/۳۱	۴۶/۳۴
۲۲	۹	۵۰	۶۰	۲	۱/۲	۸۸	۸۸	۸۹/۰۵	۸۹/۸
۲۳	۵	۱۰۰	۶۰	۲	۱/۲	۴۲	۴۲	۴۲/۴۴	۴۳/۱۱
۲۴	۹	۱۰۰	۶۰	۲	۱/۲	۵۶	۵۶	۵۶/۰۵	۵۶/۶۷
۲۵	۵	۵۰	۳۰	۳	۱/۲	۴۵	۴۵	۳۹/۶۵	۳۸/۹

راندمان حذف سرب و کادمیوم(%)				فاصله (cm)	دانسیته جریان (mA/cm ²)	زمان واکنش (min)	غلظت اولیه فلز (mg/l)	pH	شماره آزمایش
پیش بینی شده		واقعی							
pb	cd	pb	cd						
۴۴/۵۳	۴۱/۴۲	۴۷	۴۷	۱/۲	۳	۳۰	۱۰۰	۵	۲۷
۳۵/۴	۳۳/۹۸	۳۵	۳۵	۱/۲	۳	۳۰	۱۰۰	۹	۲۸
۵۰/۳	۵۱/۵	۵۰	۵۰	۱/۲	۳	۶۰	۵۰	۵	۲۹
۹۱/۹۲	۹۶/۰۶	۹۰	۹۶	۱/۲	۳	۶۰	۵۰	۹	۳۰
۵۴/۰۶	۵۴/۰۲	۴۹	۴۹	۱/۲	۳	۶۰	۱۰۰	۵	۳۱
۶۵/۵۵	۶۷/۵۸	۶۸	۶۸	۱/۲	۳	۶۰	۱۰۰	۹	۳۲
۶۰/۱۴	۶۲/۲۴	۶۲	۶۲	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۲/۲۴	۳۳
۹۲/۸۲	۹۷/۴۸	۹۰	۹۶	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۱۱/۷۶	۳۴
۳۰/۸۱	۲۷/۶۶	۲۸	۲۸	۰/۶	۲/۵	۴۵	۱۵/۵	۷	۳۵
۱۷/۱۵	۱۱/۰۶	۱۹	۹	۰/۶	۲/۵	۴۵	۱۳۴/۵	۷	۳۶
۱۷/۸۸	۱۷/۸۸	۱۵	۱۵	۰/۶	۲/۵	۳/۹	۷۵	۷	۳۷
۵۸/۰۸	۵۸/۸۵	۶۰	۶۰	۰/۶	۲/۵	۸۰/۷	۷۵	۷	۳۸
۲۰/۶۷	۲۰/۵۶	۲۰	۲۰	۰/۶	۱/۳۱	۴۵	۷۵	۷	۳۹
۵۱/۲۸	۵۲/۱۶	۵۱	۵۱	۰/۶	۳/۶۹	۴۵	۷۵	۷	۴۰
۴۲/۷۹	۴۲/۷۸	۴۳	۴۳	۰/۲	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۱
۶۱/۱۷	۹۴/۶۱	۶۰	۶۰	۱/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۲
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۰	۸۷	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۳
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۲	۹۰	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۴
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۰	۹۴	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۵
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۰	۹۲	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۶
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۸۶	۹۳	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۷
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۴	۹۰	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۸
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۳	۹۱	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۴۹
۹۱/۲	۹۱/۵۲	۹۴	۹۴	۰/۶	۲/۵	۴۵	۷۵	۷	۵۰

شماره آزمایش	pH	غلظت اولیه فلز (mg/l)	زمان واکنش (min)	دانسیته جریان (mA/cm ²)	فاصله بین الکترودها (cm)	راندمان حذف کبات (%)	
						واقعی	پیش بینی شده
۱	۵	۳۰	۳۰	۲	۰/۶	۵۱	۵۱/۵۵
۲	۹	۳۰	۳۰	۲	۰/۶	۷۶	۷۴/۱۴
۳	۵	۵۰	۳۰	۲	۰/۶	۵۷	۶۰/۷۱
۴	۹	۷۰	۳۰	۲	۰/۶	۷۵	۶۹/۴۵
۵	۵	۳۰	۶۰	۲	۰/۶	۵۳	۵۳/۱۴
۶	۹	۷۰	۶۰	۲	۰/۶	۷۸	۸۲/۰۶
۷	۵	۷۰	۶۰	۲	۰/۶	۶۶	۶۵/۵
۸	۹	۳۰	۶۰	۲	۰/۶	۸۵	۸۴/۸۸
۹	۵	۷۰	۳۰	۳	۰/۶	۷۹	۶۵/۷۶
۱۰	۹	۳۰	۳۰	۳	۰/۶	۸۸	۸۷/۹۴
۱۱	۵	۳۰	۳۰	۳	۰/۶	۶۵	۷۰/۴۶
۱۲	۹	۳۰	۳۰	۳	۰/۶	۸۸	۸۷/۹۴
۱۳	۵	۷۰	۶۰	۳	۰/۶	۶۵	۶۷/۳۸
۱۴	۹	۷۰	۶۰	۳	۰/۶	۸۶	۸۵/۷۵
۱۵	۵	۳۰	۶۰	۳	۰/۶	۷۶	۸۱/۶۱
۱۶	۹	۳۰	۶۰	۳	۰/۶	۱۰۰	۱۰۰
۱۷	۵	۷۰	۳۰	۲	۱/۲	۶۶	۶۰/۲۰
۱۸	۹	۳۰	۳۰	۲	۱/۲	۶۰	۷۴
۱۹	۵	۳۰	۳۰	۲	۱/۲	۸۰	۸۱/۸۳
۲۰	۹	۷۰	۳۰	۲	۱/۲	۶۴	۶۴/۴۵
۲۱	۵	۷۰	۶۰	۲	۱/۲	۶۶	۶۶/۸۱
۲۲	۹	۳۰	۶۰	۲	۱/۲	۸۶	۸۸/۱۲
۲۳	۵	۳۰	۶۰	۲	۱/۲	۵۶	۶۳/۲۶
۲۴	۹	۷۰	۶۰	۲	۱/۲	۷۶	۷۶/۱۸
۲۵	۵	۳۰	۳۰	۳	۱/۲	۸۶	۸۵/۱۳

ادامه جدول ۳ - طراحی آزمایش‌ها با استفاده از طرح مرکب مرکزی برای پنج متغیر مستقل مورد مطالعه در حذف کبات و نتایج آن

شماره آزمایش	pH	غلظت اولیه فلز (mg/l)	زمان واکنش (min)	دانسیته جریان (mA/cm ²)	فاصله بین الکترودها (cm)	راندمان حذف کبات (%)	
						واقعی	پیش بینی شده
۲۶	۹	۷۰	۳۰	۳	۱/۲	۷۵	۷۲/۳۵
۲۷	۵	۷۰	۳۰	۳	۱/۲	۶۸	۷۵/۷۶
۲۸	۹	۳۰	۳۰	۳	۱/۲	۹۳	۹۱/۶۹
۲۹	۵	۳۰	۶۰	۳	۱/۲	۸۱	۸۴/۱۹
۳۰	۹	۷۰	۶۰	۳	۱/۲	۸۷	۸۶/۱۲
۳۱	۵	۷۰	۶۰	۳	۱/۲	۸۲	۷۶/۷۵
۳۲	۹	۳۰	۶۰	۳	۱/۲	۱۰۰	۱۰۰
۳۳	۲/۲۴	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۳۷	۴۱/۷۵
۳۴	۱۱/۷۶	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۱	۷۵/۳۲
۳۵	۷	۹۷/۵۷	۴۵	۲/۵	۰/۹	۷۶	۸۰/۱۸
۳۶	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۸	۸۴/۶۷
۳۷	۷	۵۰	۳۲/۹	۲/۵	۰/۹	۷۲	۷۱/۷۱
۳۸	۷	۵۰	۷/۸۰	۲/۵	۰/۹	۸۶	۸۵/۴۶
۳۹	۷	۵۰	۴۵	۱/۳۱	۰/۹	۷۰	۶۸/۲۵
۴۰	۷	۵۰	۴۵	۳/۶۹	۰/۹	۹۷	۹۷/۸۲
۴۱	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۲	۵۳	۵۵/۶۹
۴۲	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۱/۶	۷۰	۶۶/۶۹
۴۳	۷	۲/۴۳	۴۵	۲/۵	۰/۹	۱۰۰	۹۴/۵
۴۴	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۵	۸۴/۶۷
۴۵	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۹۷	۶۷/۸۴
۴۶	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۷۶	۸۴
۴۷	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۳	۸۴/۲۴
۴۸	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۷	۸۴/۶۷
۴۹	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۰	۸۴/۶۷
۵۰	۷	۵۰	۴۵	۲/۵	۰/۹	۸۲	۸۴/۶۷

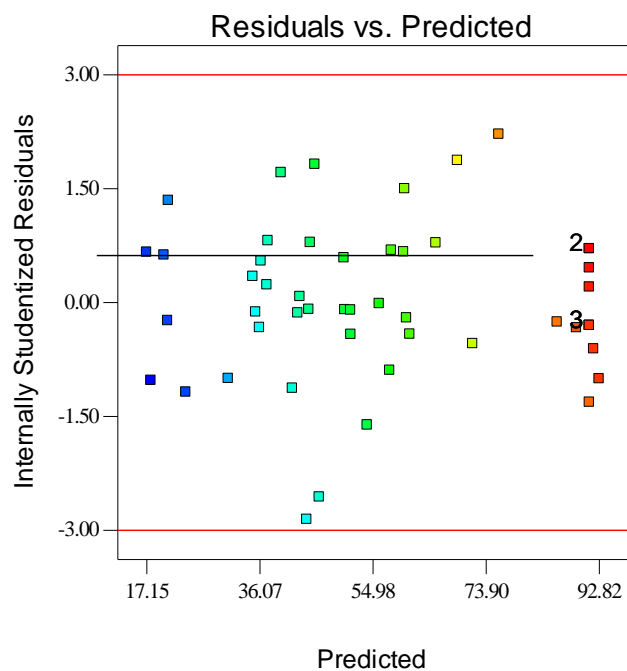
یافته ها



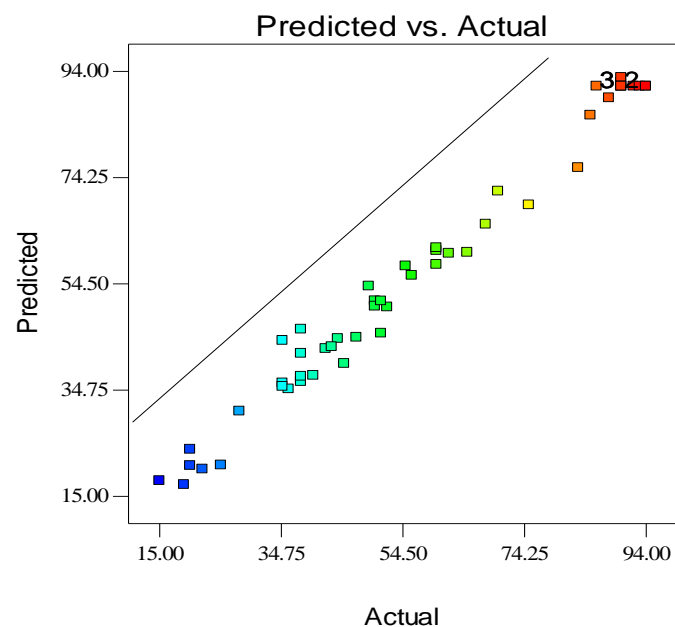
برازش و انتخاب مدل

از روش های بررسی مطلوبیت مدل، رسم نمودار پراکنش باقی مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده و یا مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی به دست آمده است.

شکل ۳ - الف - پراکنش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و ب - باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای فلز سرب را نشان می‌دهد.

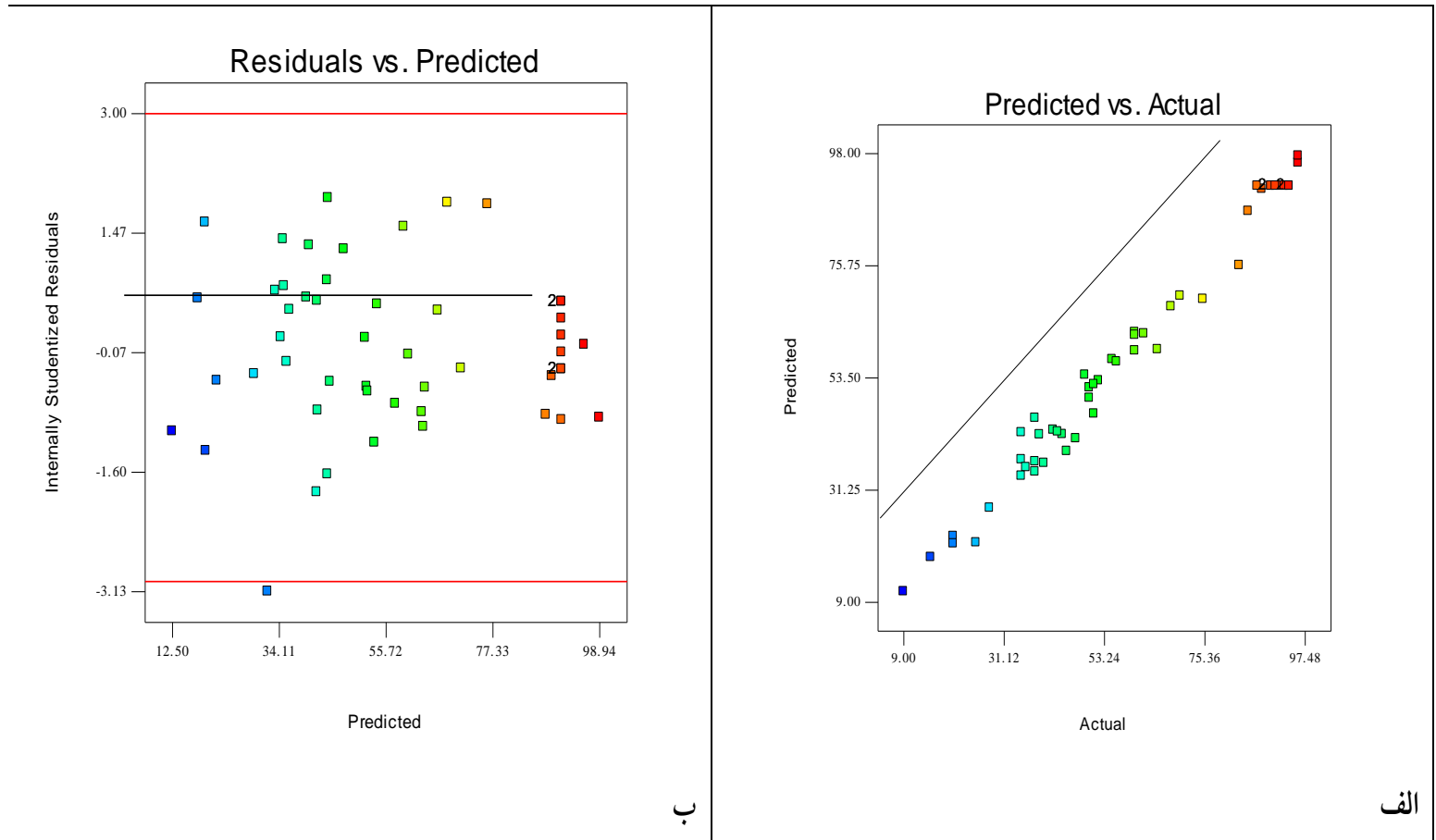


ب.

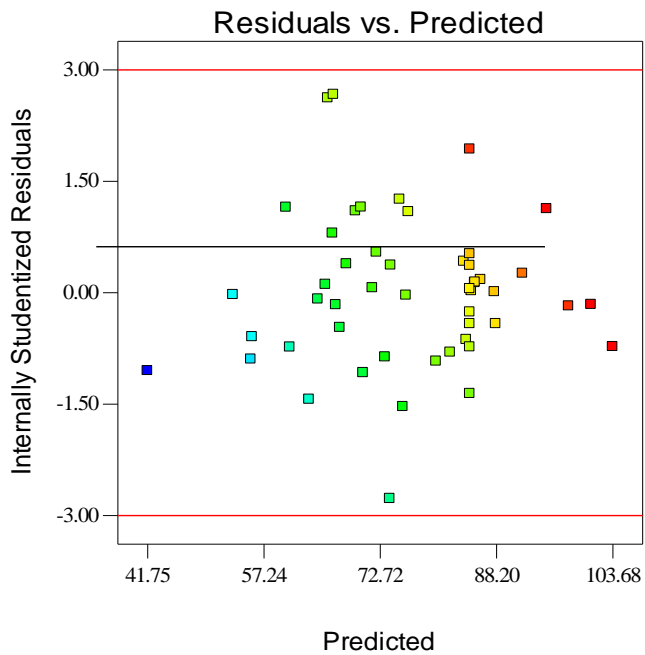


الف

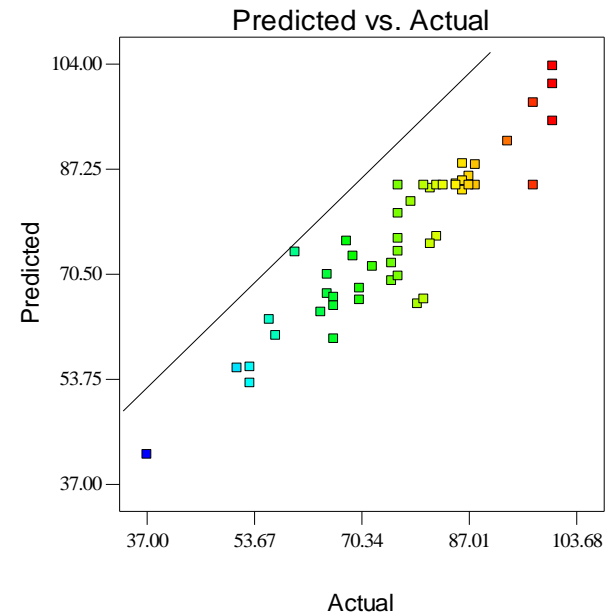
شکل ۴ - الف - پراکنش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و ب - باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده
برای فلز کادمیوم را نشان می‌دهد.



شکل ۵ - الف- پراکنش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و ب- باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای فلز کبالت را نشان می‌دهد.



ب.

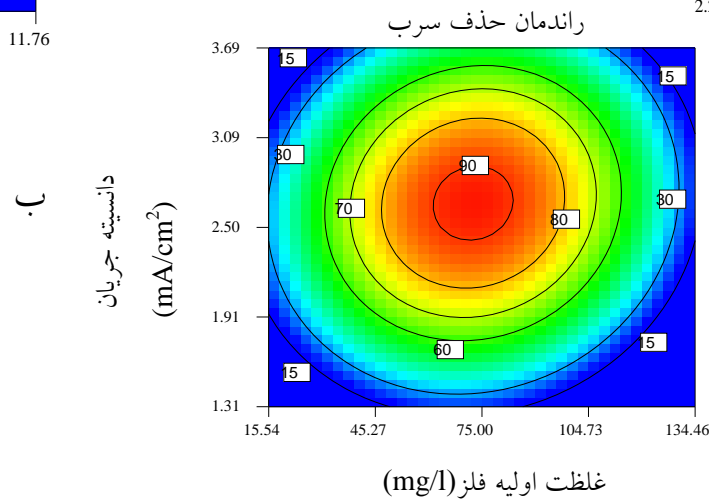
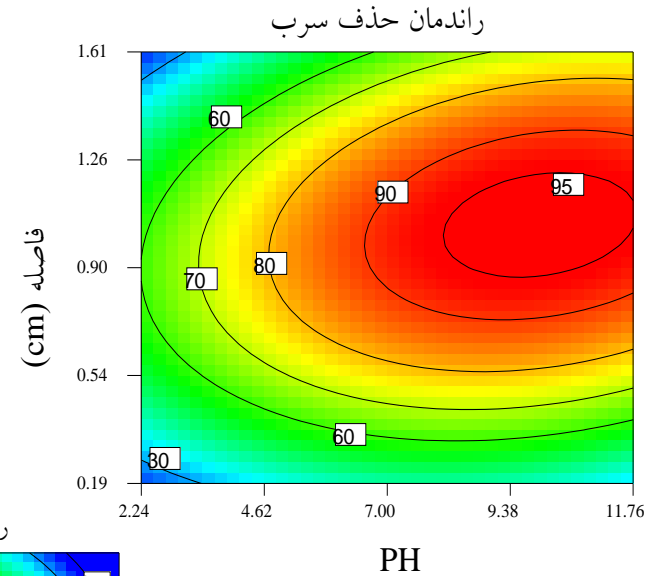
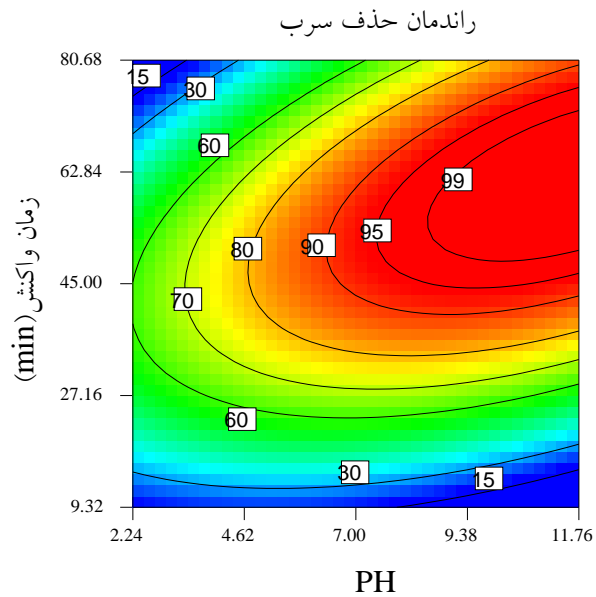


الف

برابری واریانس‌ها و توزیع نرمال داده‌ها از فرضیات پایه‌ای تحلیل واریانس هستند. نمودار (الف) نشان می‌دهد که آیا پراکنش داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. اگر نقاط روی یک خط راست قرار گرفته باشند، می‌توان فرض توزیع نرمال داده‌ها را پذیرفت. در این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که داده‌های به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌ها با داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل با هم انطباق قابل قبولی دارند. بنابراین فرضیه توزیع نرمال داده‌ها معتبر است. شکل (ب) مقادیر پاسخ پیش‌بینی‌شده برای هر آزمایش توسط مدل در مقابل باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان پذیرفت که نقاط دارای توزیع تصادفی هستند و از هیچ الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. بنابراین فرض برابری واریانس‌ها تأیید می‌گردد.

سپس با ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مستقل در مقدار متوسط (mid range)، نمودار هم‌تراز اثرات متقابل آن‌ها برای هر فلز به‌صورت دوتایی رسم گردید. این نمودارها در شکل‌های بعدی نشان داده شده است.

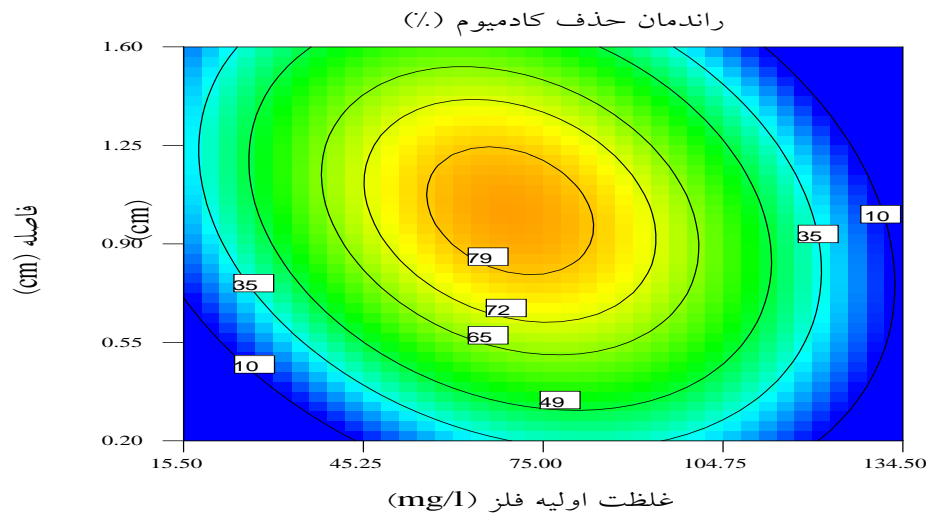
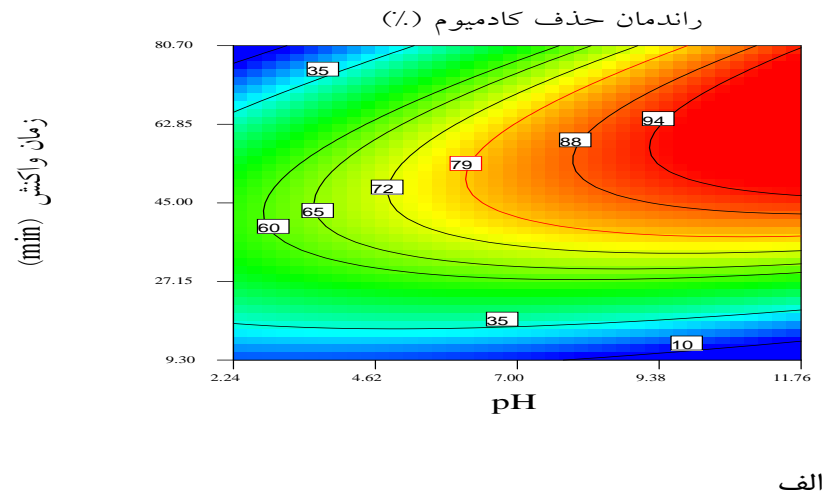
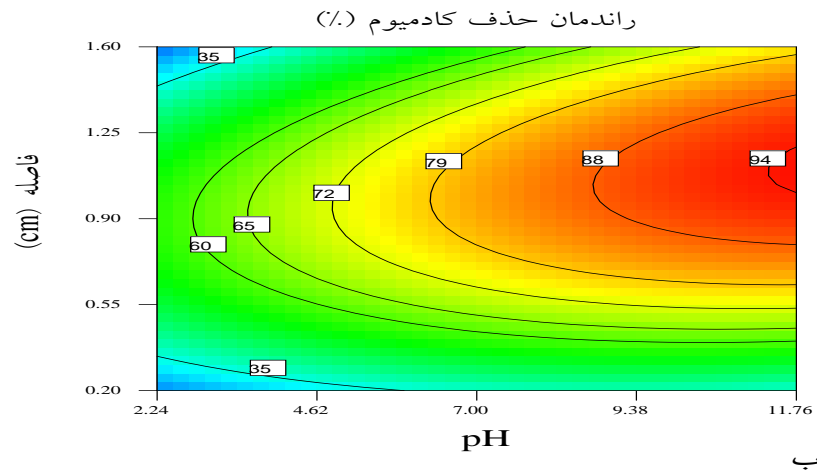
شکل ۶ - یافته های مربوط به فلز سرب



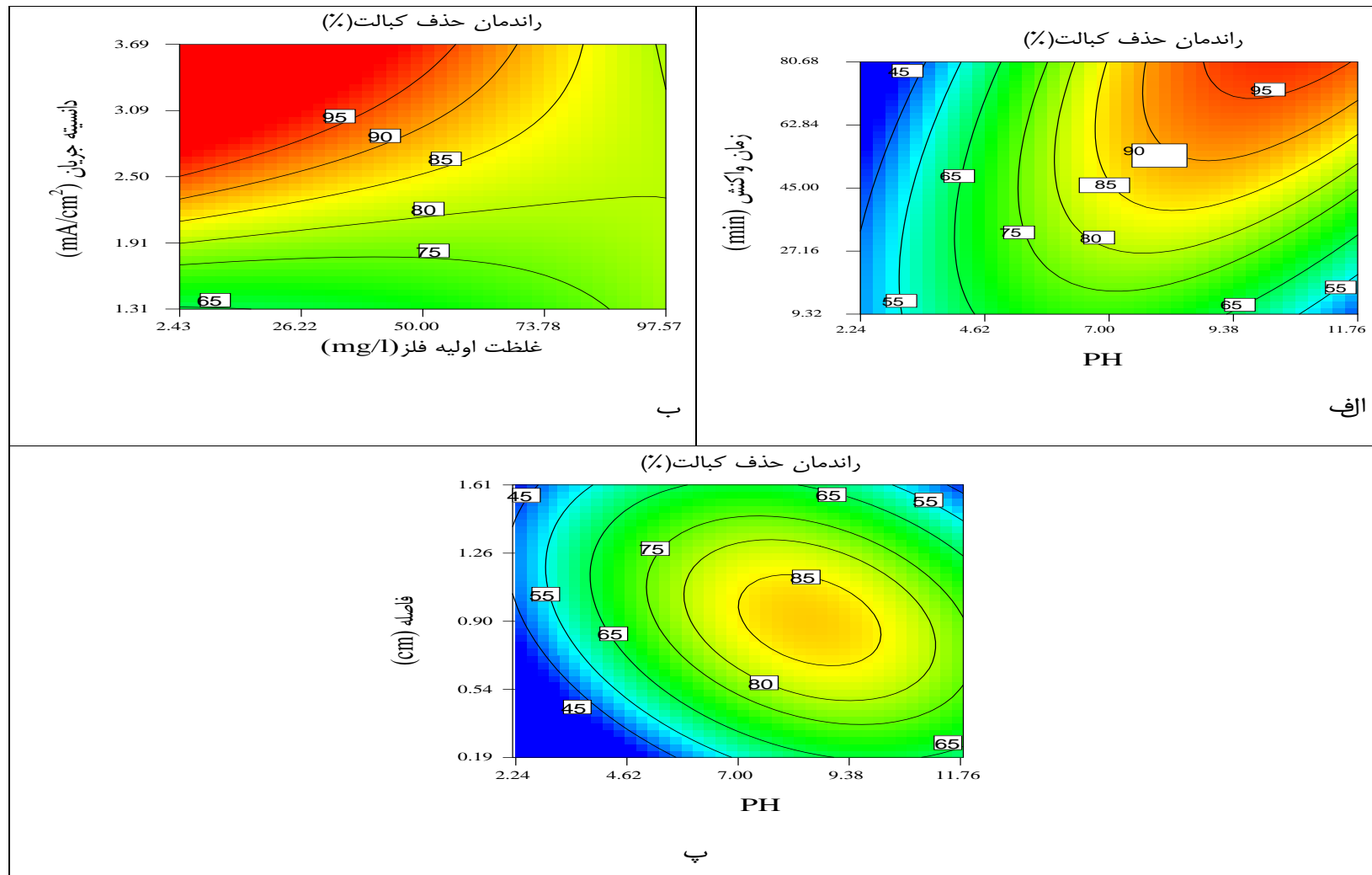
الف

ب

شکل ۷ - یافته های مربوط به کادمیوم



شکل ۸ - یافته های مربوط به کبالت





بحث و نتیجه گیری

دلائل مطابقت	نتایج مطالعات انجام شده	یافته‌های مطالعه حاضر
<p>pH پایین برای شکل گیری یون های هیدروکسید مطلوب نمی باشد و مانعی برای انجام فرآیند انعقاد الکتریکی است.</p> <p>راندمان های بالای حذف فلزات سنگین در pH بالا، به ترسیب هیدروکسید های فلزی در کاتد نسبت داده می شود.</p>	<p>کلادیواس کبار و همکاران از فرآیند انعقاد الکتریکی برای حذف مس، سرب و کادمیوم استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش pH، میزان ترسیب منعقدکننده افزایش یافت. در pH اسیدی، یون های منعقدکننده بیش تر به شکل محلول هستند، در نتیجه امکان تشکیل لخته و جذب سطحی فلزات سنگین مورد مطالعه روی سطح لخته فراهم نیست. بنابراین راندمان حذف مس، سرب و کادمیوم در این فرآیند با اسیدی شدن محیط، کاهش یافت.</p>	<p>در یک فاصله ثابت، افزایش pH، باعث افزایش راندمان حذف سرب شد. به طوری که در فاصله ۰/۹ cm، در pH های ۷/۵ و ۹، راندمان حذف به ترتیب برابر با ۹۰ و ۹۵ درصد بود.</p>
<p>عموماً در pH بالا، تشکیل هیدروکسیدهای فلزی باعث حذف بیش تر فلزات سنگین، از جمله سرب می شود. نتایج این تحقیق با مطالعه ما همخوانی دارد.</p>	<p>نتایج مطالعه شهریاری، در حذف سرب از محیط های آبی طی فرآیند انعقاد الکتریکی نشان داد که با افزایش pH راندمان حذف سرب افزایش می یابد.</p>	

یافته‌های مطالعه حاضر	نتایج مطالعات انجام شده	دلایل مطابقت
در این مطالعه، با افزایش دانسیته جریان، راندمان حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت افزایش یافت.	Claudio Escobara و همکاران گزارش نمودند که در فرآیند انعقاد الکتریکی، با افزایش دانسیته جریان، راندمان حذف سرب، کادمیوم و مس افزایش یافت.	براساس قانون فارادی، جریان‌های به کار برده شده‌ی بالا باعث تولید بیش‌تر یون آلومینیوم می‌شود. این اتفاق باعث افزایش راندمان حذف فلزات سنگین می‌شود.
	نتایج مطالعه محمد ال شنگ و همکاران نشان داد که افزایش دانسیته جریان منجر به افزایش راندمان حذف فلزات سنگین شد. به‌طوری که در مقادیر دانسیته جریان ۱، ۲، ۳ و ۴ mA/cm ² ، راندمان حذف به‌ترتیب برابر با ۲۳ - ۲۹، ۵۲ - ۶۲، ۷۵ - ۸۳ و ۹۸ - ۱۰۰ درصد بوده است.	
در این مطالعه، مشاهده شد که در یک pH ثابت، با افزایش زمان واکنش تا محدوده ۶۵ دقیقه، راندمان حذف افزایش یافته و در برخی از pHها، راندمان به ۹۵ درصد هم رسید.	شفایی و همکاران راندمان حذف کبالت در زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه به‌ترتیب از ۶۸ و ۹۹ درصد گزارش کردند.	براساس قانون فارادی، با افزایش زمان واکنش، غلظت یون‌های آلومینیوم و لخته‌های هیدروکسید افزایش می‌یابد. در نتیجه راندمان حذف فلزات سنگین افزایش می‌یابد.
	نتایج تحقیق سوبرمانین و سودون و همکاران نشان داد که در فرآیند انعقاد الکتریکی با افزایش زمان واکنش، میزان حذف کادمیوم افزایش یافت. این روند افزایشی تا رسیدن به زمان واکنش ۳۰ دقیقه ادامه داشت.	
	جون لیو و همکاران گزارش نمودند که با افزایش زمان واکنش از ۱ تا ۳۰ دقیقه، راندمان حذف نیکل از ۹/۵ به ۹۸ درصد افزایش یافت.	

یافته‌های مطالعه حاضر	نتایج مطالعات انجام شده	دلایل مطابقت
<p>در $pH = 7$، راندمان حذف سرب در غلظت‌های پایین، بالا است اما در غلظت‌های بالا، افزایش غلظت باعث کاهش راندمان حذف شده است. در $pH = 9$، در غلظت‌های کمتر از 75 mg/l، راندمان حذف با افزایش غلظت اولیه افزایش یافته و در غلظت‌های بالاتر از این میزان راندمان حذف روند کاهشی داشته است، به‌طوری که در غلظت‌های کمتر از 75 mg/l، راندمان حذف به حدود ۹۵ درصد هم رسیده است.</p>	<p>نتایج مطالعه اونجلوس گت سیوس و همکاران در حذف مگنیز، مس و روی نشان داد که با افزایش غلظت اولیه مگنیز، راندمان حذف این فلز افزایش یافت. اما راندمان حذف مس و روی با افزایش غلظت اولیه این دو فلز ارتباط معنی‌داری نداشت.</p>	<p>- فلزات بیش‌تر در محلول، باعث ایجاد واکنش‌های سریع‌تر در الکترودها می‌شود. - در بارگذاری بالای غلظت‌های اولیه، یون‌ها شانس بیش‌تری برای حذف شدن از محلول دارند.</p>
	<p>در مطالعه شفایی و همکاران، اثر غلظت اولیه فلز کبالت روی راندمان حذف بررسی شد. غلظت‌های اولیه مورد مطالعه در محدوده ۲۵ تا 400 mg/l بودند. زمانی که غلظت اولیه کبالت افزایش می‌یافت راندمان حذف کم می‌شد. برای مثال بعد از گذشت ۱۵ دقیقه از زمان واکنش با غلظت‌های اولیه ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و 400 mg/l، راندمان حذف یون‌ها در محلول‌های آبی به‌ترتیب برابر با ۹۸، ۸۹، ۸۴، ۷۲ و ۶۰ درصد به‌دست آمد.</p>	

یافته‌های مطالعه حاضر	نتایج مطالعات انجام شده	دلایل مطابقت
<p>در این مطالعه، در فواصل مورد مطالعه، بیش ترین راندمان حذف برای فلزات سرب، کادمیوم و کبالت در فاصله ۰/۹ سانتی متر به دست آمد. این نتیجه با نتایج کار سایر محققین در این زمینه همخوانی دارد.</p>	<p>اونجلوس گتسیوس و همکاران گزارش نمودند که در شدت جریان الکتریکی ثابت ۰/۳ آمپر، حذف منگنز، با افزایش فاصله بین الکترودها از ۲ به ۴cm، کاهش یافت. در این مطالعه، بهترین نتایج حذف در کمترین فاصله مورد مطالعه (۲cm) به دست آمد.</p>	<p>با افزایش فاصله بین الکترودها، شدت جریان الکتریکی کاهش یافته و در نتیجه تحرک یون‌های تولید شده کم‌تر می‌شود. در نتیجه برای تجمع و تولید لخته به زمان بیش‌تری نیاز است.</p>
	<p>منصوریان و همکاران گزارش نمودند که بیشترین راندمان حذف سرب و روی در فرآیند انعقاد الکتریکی در فاصله ۱ cm بین الکترودها به دست آمد.</p>	

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس و رگرسیون پارامترهای پاسخ به همراه معادلات مربوط به

هر فلز

A: pH B: غلظت اولیه فلز C: زمان واکنش D: دانسیته جریان E: فاصله بین الکترودها

Response	Final equation in term of code factor	P-value	R ²	Adj.R ²	AP	CV	SD
Pb	$91.2 + 6.87 A - 2.87 B + 8.45 C + 8.44 D + 3.87 E - 7.53 AB + 5.16 AC + 1.78 AE + 1.66 BD - 4.16 BE + 2.84 CD - 5.66 DE - 2.6 A^2 - 11.88 B^2 - 9.41 C^2 - 9.76 D^2 - 6.93 E^2$	<0.0001	0.98	0.94	27.6	7.54	4.22
Cd	$91.5 + 7.41 A - 3.79 B + 8.61 C + 6.64 D + 4.03 E - 7.75 AB + 5.25 AC + 1.88 AE + 1.44 BD - 4.44 BE + 2.94 CD - 5.56 DE - 2.06 A^2 - 12.76 B^2 - 9.4 C^2 - 9.75 D^2 - 6.92 E^2$	<0.0001	0.98	0.97	36.2	7.09	3.98
Co	$84.67 + 7.06 A - 3.1 B + 2.87 C + 6.22 D + 2.22 E - 2.47 A^2 - 2.78 AE - 2.47 BD - 4.62 A^2 - 4.18 E^2$	<0.0001	0.86	0.76	14	8.93	6.81

جدول ۵- بهینه سازی عددی روی داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل درجه دوم اصلاحی

فلز	pH	دانشیته جریان (mA/cm ²)	غلظت اولیه فلز (mg/l)	زمان واکنش (min)	فاصله الکترود (cm)	راندمان حذف (%)
سرب	۸/۵	۲/۵۷	۷۶	۵۰	۱/۰۲	۹۹/۹
کادمیوم	۸/۳۲	۲/۹۶	۶۵/۵	۵۴	۰/۷۲۳	۹۸/۳
کبالت	۸/۷۷	۲/۹۸۷	۳۱	۴۵/۴	۰/۸۴	۱۰۰

Optimum condition	Removal efficiency (%)		Error	Standard deviation	Desirability
	Predicted	Actual			
Pb (pH:8.5; concentration:76mg/L; time: 50 min; CD:2.57mA/cm ² ; distance:1.02cm)	99.9	97.5	2.4	±1.15	100
Cd ((pH:8.32; concentration:65.5mg/L; time: 54 min; CD:2.965 mA/cm ² ; distance:0.723cm)	97.5	98.3	0.8	±0.45	100
Co (pH:8.77; concentration:31mg/L; time:45.4 min; CD:2.987mA/cm ² ; distance:0.84cm)	100	96	4	±2.12	100

در این مطالعه تمامی پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با هم تطابق خوبی داشتند. بنابراین فرآیند EC می‌تواند برای تصفیه فاضلاب‌هایی که حاوی این فلزات سنگین هستند، مورد استفاده قرار بگیرد. این فرآیند برای پیش‌تصفیه فاضلاب‌های صنعتی حاوی فلزات سرب، کادمیوم و کبالت قبل از تصفیه زیستی احتمالی مناسب است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌های فرآیند انعقاد الکتریکی و پیش‌بینی نتایج مناسب است.

- بهتر است که آزمایشات، بر روی نمونه های واقعی فاضلاب انجام شود.
- در این مطالعه، هر یک از فلزات به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. می توان برای بررسی اثرات مداخله کننده این فلزات، هر سه فلز با هم مورد مطالعه قرار گیرند.
- این مطالعه می تواند برای جنس های دیگر الکترودها نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مورد مقایسه قرار گیرد.
- این مطالعه می تواند در شرایط دمایی مختلف نیز مورد مطالعه قرار بگیرد.
- با توجه به بررسی دانسیته جریان الکتریکی در این مطالعه، می توان میزان انرژی الکتریکی مصرفی را اندازه گیری کرد.

1. Al Aji B, Yavuz Y, Koparal S. Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. *Separation and Purification Technology* 2012 Feb; 86:248-254.
2. Ruparelia J.P, Duttagupta S.P, Chatterjee A.K, Mukherji S. Potential of carbon nanomaterials for removal of heavy metals from water. *Desalination* 2008 Nov; 232(1-3):145-156.
3. Chile S, [Saifuddin](#) M, Kumaran P. Removal of heavy metal from industrialwastewater using chitosan coated oil palm shell charcoal, *Electron. Electronic journal of Biotechnology* 2005 ; 8:43-53.
4. Qiu Y.W. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculturefood chains in Daya Bay, South China. [Estuarine, Coastal and Shelf Science](#) 2015 Sep;163(B):7-14.
5. Fulekar M.H, Jadia C. Phytoremediation of heavy metals. *African Journal of Biotechnology* 2009 Mar; 8(6):921-928.
6. Akpor O.B, Ohiobor G.O, Olaolu T.D. Heavy metal pollutants in wastewater effluents: sources, effectsand remediation. *Advances in Bioscience and Bioengineering* 2014 ; 2(4):37-43.
7. Srivastava N.K, Majumder C.B. Novel biofiltration methods for the treat- ment of heavy metals from industrial wastewater. [Hazardous Materials](#) 2008 Feb; 151(1):1-8.
8. Maanan M. Trace metal contamination of marine organisms from the Moroccan North Atlantic coastal environments. *Environmental Pollution* 2008 ;153:176-183.
9. [Kyzas](#) G.Z, Deliyanni E.A. Mercury(II) removal with modified magneticchitosan adsorbents. *Molecules* 2013 May;18(6):6193-6214.
10. Hao Y.M, Man C, Hu Z.B. Effective removal of Cu(II) ions from aqueoussolution by amino-functionalized magnetic nanoparticles. [Hazardous Materials](#) 2010 Dec; 184(1-3):392-399.

با تشکر از توجه
شما

